Commission géologique
du Canada

Recherches en cours
2001-C22

*Assimilation du carbone, des nutriments et des métaux lourds par l'épinette noire (*Picea mariana *(Mill). BSP) à proximité de la fonderie Horne, Rouyn-Noranda, Québec*

J. Marion, M.M. Savard, C. Bégin et M. Parent

2001

Ressources naturelles Canada
Natural Resources Canada

Canada

©Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2001
N° de catalogue M44-2001/C22F
ISBN 0-660-96474-0

En vente à partir du site Web de la Librairie de la Commission géologique du Canada, à l'adresse http://www.nrcan.gc.ca/cgc/bookstore (sans frais : 1-888-252-4301)

Les bibliothèques de dépôt d'un bout à l'autre du pays ont accès à la présente publication par l'intermédiaire du site Web du Programme des services de dépôt (http://dsp-psd.tpsgc.gc.ca).

Prix sujet à changement sans préavis

Les demandes de permission pour reproduire cet article, en tout ou en partie, à des fins d'utilisation commerciale, de revente ou de redistribution doivent être adressées à la Division de l'information des sciences de la Terre, pièce 200, 601, rue Booth, Ottawa (Ontario) K1A 0E8.

Addresses des auteurs

J. Marion *(jmarion@nrcan.gc.ca)*
M.M. Savard *(msavard@nrcan.gc.ca)*
C. Bégin *(cbegin@nrcan.gc.ca)*
M. Parent *(miparent@nrcan.gc.ca)*
CGC–Québec, Québec
880, chemin Ste-Foy, C.P. 7500
Sainte-Foy, Québec G1V 4C7

Assimilation du carbone, des nutriments et des métaux lourds par l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill). BSP) à proximité de la fonderie Horne, Rouyn-Noranda, Québec

J. Marion, M.M. Savard, C. Bégin et M. Parent

CGC–Québec, Québec

*Marion, J., Savard, M.M., Bégin, C. et Parent, M., 2001 : Assimilation du carbone, des nutriments et des métaux lourds par l'épinette noire (*Picea mariana *(Mill). BSP) à proximité de la fonderie Horne, Rouyn-Noranda, Québec; Commission géologique du Canada, Recherches en cours 2001-C22, 9 p.*

Résumé : La combinaison de traceurs dendrogéochimiques complémentaires, associés à des fonctions distinctes de l'arbre, constitue un nouvel outil de monitoring environnemental. Ces traceurs, isotopes stables du carbone, nutriments et métaux lourds dans les cernes de croissance des arbres permettent de reconnaître les effets des polluants anthropiques de source ponctuelle. Les premières étapes d'assimilation des traceurs sont très bien connues : l'absorption active des métaux lourds et des nutriments s'effectue via le système radiculaire, alors que celle du carbone se fait par les feuilles. Afin de définir les étapes subséquentes de l'assimilation, la présente étude analyse la distribution des isotopes et des éléments à l'intérieur de la tige, des branches et des feuilles d'une épinette noire. La voie d'assimilation du carbone est marquée par un processus Rayleigh qui suggère la même priorité d'allocation que pour les nutriments. Les résultats valident également le protocole d'échantillonnage préalablement établi pour les études dendrogéochimiques menées dans le cadre du programme des Métaux dans l'environnement (MEDE).

Abstract: The combination of complementary dendrogeochemical tracers associated with discrete functions in trees constitutes a new environmental monitoring tool. These tracers, carbon isotopes, nutrients, and heavy metals in tree rings record the effects of anthropogenic point-source contaminants. Initial tracer assimilation steps are well known: active absorption of heavy metals and nutrients through the root system and assimilation of carbon through foliage. To better define subsequent assimilation steps, this study analyzes isotopic and elemental distribution within the stem, branches, and leaves of a black spruce specimen. Carbon assimilation follows a Rayleigh process that suggests the same priority of allocation as for nutrients. Results also confirm the previously established sampling protocol in the Metals in the Environment (MITE) program for dendrogeochemical environmental surveys.

INTRODUCTION

Le projet DINAMITE (Dendrogeochemical Investigation of Anthropogenic Metals in the Environment [Étude dendrogéochimique des métaux anthropiques dans l'environnement]), mené dans le cadre du programme des Métaux dans l'environnement (MEDE) (1997–2002) de la Commission géologique du Canada, s'appuie sur une approche dendrogéochimique (géochimie des cernes de croissance des arbres). L'équipe DINAMITE appartient au groupe de recherche sur les sources ponctuelles de polluants. Le principal objectif de recherche est de mettre en évidence les contributions respectives des métaux lourds d'origine naturelle et anthropique dans la région avoisinant la fonderie de cuivre Horne à Rouyn-Noranda. Les objectifs particuliers du projet sont de fournir une perspective historique à haute résolution temporelle, d'évaluer la distribution des polluants émis par la fonderie et de comprendre l'impact de cette pollution sur la forêt boréale qui l'entoure.

Depuis le début de ce projet de recherche, les résultats obtenus sur les séries dendrochronologiques montrent des changements majeurs dans les rapports isotopiques et les concentrations de métaux chez les spécimens étudiés à proximité de la fonderie Horne (Bégin et al., 1998; Savard et al., 1999). Les cernes de croissance formés avant l'ouverture de la fonderie indiquent un comportement dendrogéochimique régi par les conditions naturelles (écologie, climat), alors que les cernes contemporains des activités de la fonderie affichent un comportement franchement influencé par les émissions polluantes (Savard et al., 2000). La perspective historique des métaux dans l'environnement semble donc solidement établie grâce aux longues séries dendrogéochimiques étudiées dans le cadre du programme MEDE.

Depuis l'eau du sol, l'arbre absorbe les éléments dissous par son système racinaire. Le carbone est tiré de l'atmosphère ambiant par les feuilles, et le taux d'assimilation est régi par l'ouverture des stomates. Les processus subséquents d'assimilation des éléments et des isotopes sont toutefois moins bien connus. Comment se distribuent les rapports $\delta^{13}C$ et les concentrations des éléments le long du tronc, dans les branches et dans le feuillage? Afin de répondre à cette question, l'équipe DINAMITE a élaboré une étude détaillée des processus d'assimilation des traceurs par les arbres et s'est jointe au réseau de recherche du MEDE. Les buts de l'étude sont 1) d'identifier les processus d'assimilation des nutriments, des métaux et des isotopes du carbone en analysant les parties aériennes de l'arbre, soit feuillage, branches et tige, et 2) de valider le protocole d'échantillonnage adopté dans le cadre du projet DINAMITE. Nous présentons ici les premiers résultats qui portent sur l'analyse d'un arbre situé à proximité de la fonderie Horne.

DESCRIPTION DU SITE

L'arbre analysé provient de Dinamite 1 qui fait partie du réseau de sites étudiés dans le cadre du programme MEDE (fig. 1). Ce site est situé à 8,7 km au nord-est de la fonderie Horne. Depuis sa mise en opération en 1927, la fonderie émet des quantités appréciables de métaux sous forme de particules contenant des métaux lourds. Elle rejette également des gaz, dont du dioxyde de soufre (SO_2). Jusqu'à l'installation de mesures de contrôle des polluants à la fin des années 1980, la fonderie comptait parmi les plus importantes sources de SO_2 au Canada (Ministère de l'Environnement et de la Faune, 1996).

Le site étudié est une petite pessière noire relativement bien drainée typique de la forêt boréale. Elle occupe une butte composée de till non remanié caractérisé par un podzol humo-ferrique. La roche affleurant à proximité du site est une rhyolite faisant partie de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de l'Abitibi. Les individus les plus âgés de la pessière sont apparus vers 1860–1870, indiquant ainsi qu'ils ont survécu à plusieurs perturbations naturelles (feux, épidémies) et anthropiques (coupes forestières).

La proximité du site Dinamite 1 par rapport à la fonderie Horne et sa position sous les vents dominants estivaux lui confèrent une exposition importante aux contaminants. Les épinettes provenant de ce site contiennent par conséquent des quantités accrues de métaux et du carbone dont les rapports isotopiques indiquent un effet de stress atmosphérique associé aux émissions de la fonderie.

MÉTHODOLOGIE

L'épinette noire analysée a été sélectionnée en fonction des critères suivants : une bonne croissance radiale, une abondance et une apparence saine du feuillage, une distribution normale du feuillage et une absence d'anomalie physique

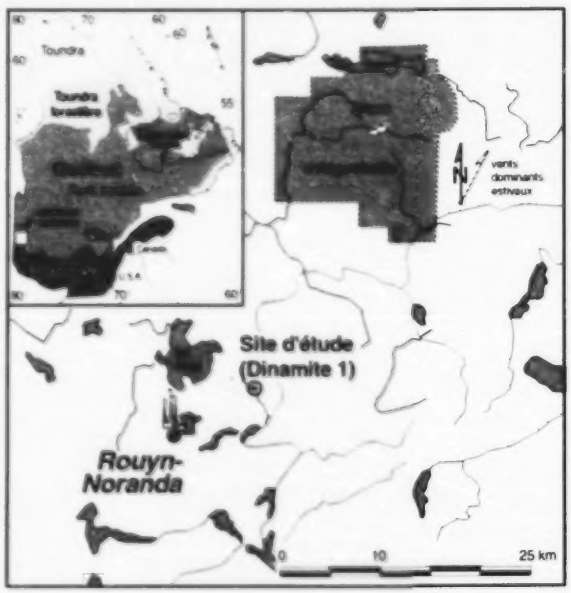

Figure 1. *Carte de localisation du site à l'étude. Dans le coin supérieur gauche, une carte des domaines bioclimatiques du Québec.*

dans la structure de l'arbre. L'individu retenu avait une soixantaine d'années et mesurait 15.5 m. Deux niveaux de branches ont été échantillonnés, soit à la mi-hauteur de l'arbre (à 6 m du sol) et dans la zone apicale (à 13.5 m). Le long du tronc, une section transversale a été prélevée à tous les 150 cm depuis le collet jusqu'à une hauteur de 13.5 m. L'espacement entre les échantillons a été réduit à 50 cm entre 13.5 m de hauteur et la cime de l'arbre (fig. 2). Les 14 sections transversales du tronc et les branches ont été rapportées en laboratoire afin de poursuivre leur préparation. Des sections ont été prélevées à intervalles de 25 cm sur l'axe principal de chacune des branches (deux sections sur la branche apicale et six sur la branche médiane). Sur chacune des branches, les feuilles des trois dernières années de croissance (1997, 1998, 1999) ont été échantillonnées sur la section proximale (près du tronc) et sur la section distale afin d'analyser des feuilles provenant du centre et de la périphérie de la masse foliaire. Sur toutes les sections transversales provenant du tronc de l'épinette, les trois derniers cernes de croissance (1997, 1998, 1999) ont été séparés pour fins d'analyse géochimique. La section supérieure (à 15.5 m) ne comptait toutefois que le cerne de 1999. La section inférieure (collet de l'arbre) a été finement sablée puis la largeur des cernes a été mesurée sur quatre rayons perpendiculaires à l'aide d'un micromètre Unislide de la compagnie Velmex™, couplé à un compteur digital AcuRite III (précision de ± 0.001mm) et à un micro-ordinateur. Les manipulations exécutées en laboratoire ont été faites dans des conditions stériles, afin d'éviter tout risque de contamination par les métaux. Les feuilles n'ont subi aucun nettoyage. Chacun des 40 échantillons de xylème provenant de la tige, des 8 échantillons provenant des branches et des 12 échantillons de feuilles ont été séparés en deux portions et soumis pour l'analyse géochimique des éléments et des propriétés isotopiques.

Les concentrations de nutriments ont été mesurées à l'aide d'un ICP-AES, tandis que les métaux lourds ont été mesurés par spectroscopie d'émission avec plasma induit par haute fréquence (SE/PIHF), tandis que les métaux lourds ont été mesurés par spectrométrie de masse avec plasma induit par haute fréquence (SM/PIHF) au laboratoire d'INRS-Géoressources. L'écart-type moyen obtenu pour l'analyse par SE/PIHF est de 0.78 p. 100 pour le Ca, de 0.70 p. 100 pour le Mg, de 0.53 p. 100 pour le Mn et de 0.84 p. 100 pour le Zn. Pour l'analyse au SM/PIHF, elle est de 0.62 p. 100 pour le Cu et de 1.24 p. 100 pour le Pb. Les limites de détection sont de 7.0 ppm pour le Ca, 0.7 ppm pour le Mn, 0.22 ppm pour le Mg, 0.2 ppm pour le Cu, 0.01 ppm pour le Pb et de 1.4 ppm pour le Zn. La préparation des échantillons et l'analyse des isotopes stables du carbone ont été exécutées au Laboratoire Delta de la Commission géologique du Canada (Québec). L'analyse de la cellulose extraite a été pratiquée de manière à éviter une variation des valeurs de $\delta^{13}C$ imputable à des changements dans les proportions des constituantes du bois qui ont leurs propres valeurs de $\delta^{13}C$. L'extraction de la cellulose a été faite suivant une modification du protocole établi par Epstein et al. (1976). Les analyses ont été produites à l'aide d'un analyseur élémentaire attaché à un spectromètre de masse à rapports isotopiques (Carlo Erba + Prism III) étalonné à l'aide des étalons internationaux NBS-19, NBS-18 et IAEA-CO-9. La précision obtenue pendant la période d'analyse a été supérieure ou égale à 0.36 ‰ (2σ).

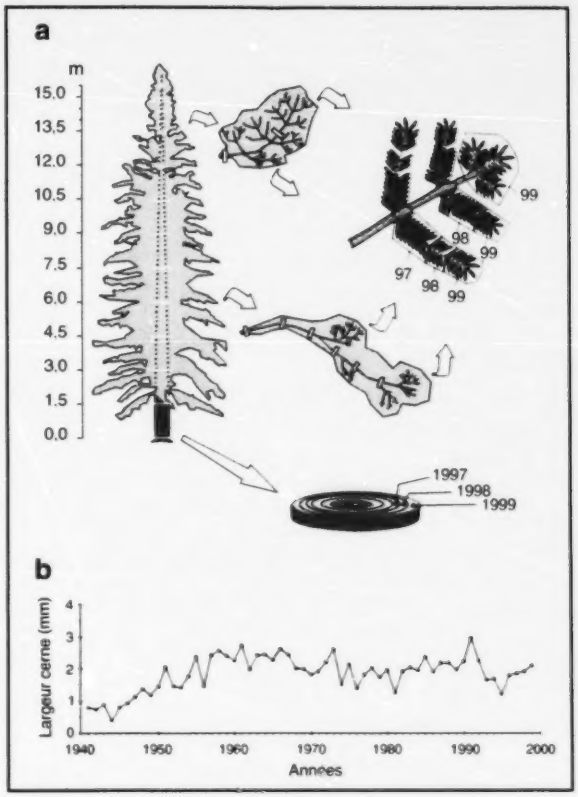

Figure 2. *a) Mode d'échantillonnage de la tige, des branches et des feuilles de l'épinette noire retenue.* ***b)*** *Courbe de croissance telle que mesurée sur la section transversale inférieure.*

RÉSULTATS

Le transport des différents éléments (minéraux, nutriments) dans l'arbre est assuré en grande partie par la sève. Après avoir été absorbés par les racines sous forme d'ions dissous dans l'eau, les éléments sont ensuite véhiculés par la sève en montant dans la tige et les branches pour finalement atteindre le système foliaire. Ce mouvement ascendant de la sève est contrôlé par la transpiration de l'appareil foliaire. Les résultats sont présentés dans l'ordre suivant : tige, branches et feuilles. Pour sa part, le carbone est produit par des processus reliés à la photosynthèse et parcourt donc le chemin inverse. Les résultats propres au carbone respecteront donc ce sens et seront présentés à partir de l'extrémité des différentes parties de l'arbre vers l'intérieur ou vers le bas.

Distribution longitudinale

La figure 3a illustre la distribution du $\delta^{13}C$ le long de la tige analysée. Au sein de la portion apicale, une augmentation significative et graduelle du $\delta^{13}C$ apparaît entre l'apex (-22,6 ‰) et la section à 12 m (-21,1 ‰). À partir de cette section vers le bas, les valeurs sont pratiquement invariables jusqu'au collet de l'arbre pour chacun des trois cernes étudiés (-21,5 ‰ en moyenne). Pour la plupart des sections, les rapports $\delta^{13}C$ des cernes diminuent du plus récent au plus âgé (de 1999 à 1997).

La distribution longitudinale de deux macro-nutriments (Ca et Mg) et d'un micro-nutriment (Mn) est présentée à la figure 3b, c et d. Un enrichissement graduel de ces éléments est observé du collet vers l'apex. Dans le cas du Mn et du Mg, la concentration est nettement plus élevée dans le dernier cerne produit (1999) sur toute la longueur de la tige. Dans la cime de l'arbre (section à 15,5 m) seul le cerne de 1999 est présent. La concentration de nutriments dépasse largement celle des sections inférieures.

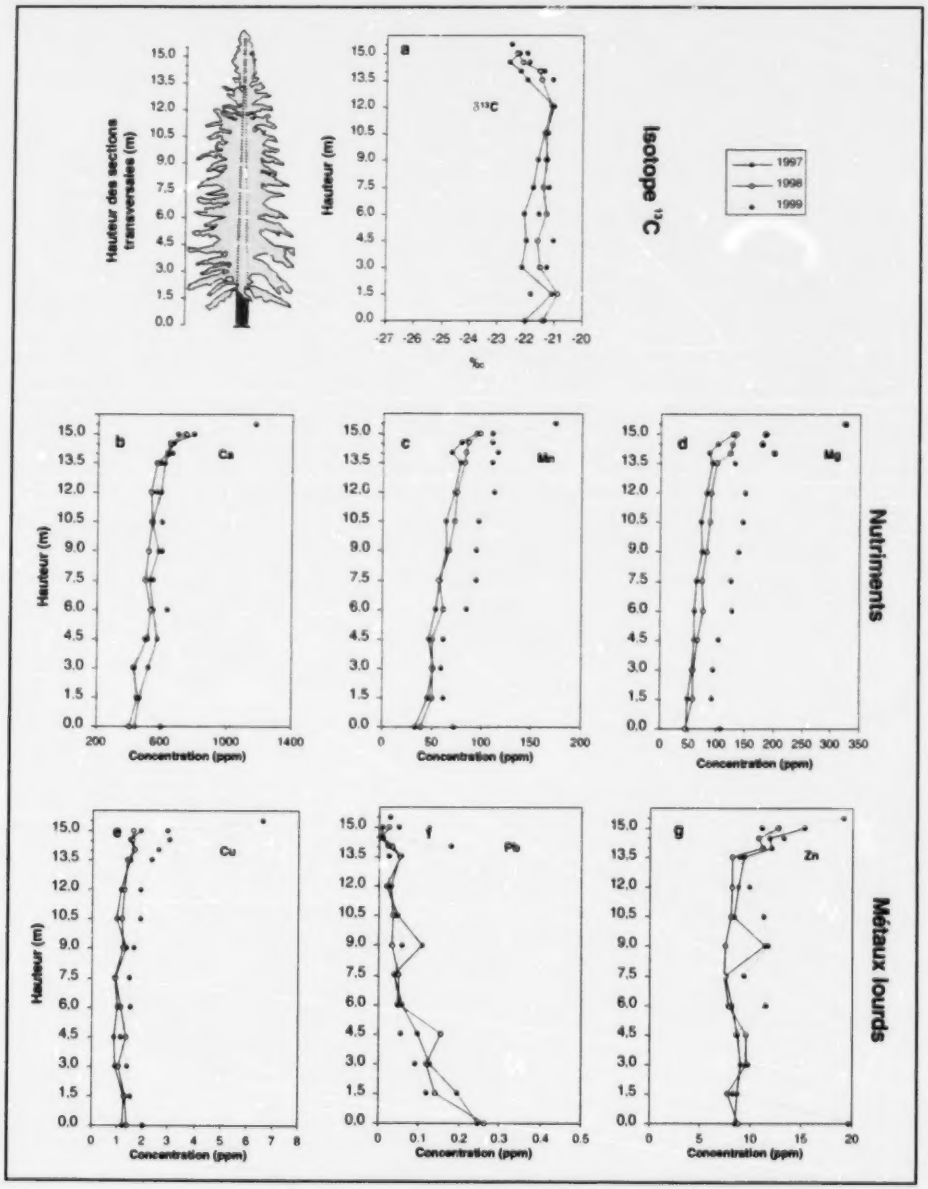

Figure 3. *Distribution des rapports $\delta^{13}C$, des nutriments et des métaux lourds le long de la tige.*

La concentration de Cu est stable tout au long de la tige sauf à l'apex où les valeurs triplent (fig. 3e). Le cerne de 1999 est cependant légèrement enrichi en Cu par rapport aux deux années précédentes sur presque toute la tige. La concentration de Pb (fig. 3f) diminue graduellement du bas vers le haut de la tige pour être quasi inexistant dans la portion apicale. Le Zn (fig. 3g) a une distribution singulière. Les cernes de 1997 et de 1998 présentent une concentration uniforme du collet à la base de la portion apicale pour ensuite s'enrichir graduellement jusqu'à la cime. Le cerne de 1999 montre une distribution beaucoup plus variable pour cet élément tout au long de la tige.

Distribution axiale

Dans la branche provenant de la portion apicale de l'épinette (à 12 m), le rapport $\delta^{13}C$ augmente de 0,9 ‰ entre l'extrémité et le point d'insertion sur le tronc (fig. 4a). Dans le cas de la branche inférieure (à 6 m), on observe une légère variation dans la partie distale, mais peu de variation dans les trois sections proximales (fig. 4b).

Le Mn et le Mg ont un comportement semblable dans les deux branches, soit un enrichissement graduel vers l'extrémité de la branche. Par contre, à l'intérieur de la branche médiane, le Mn est assez stable. Le Ca a cependant un comportement inverse : on y observe un appauvrissement vers l'extrémité de la branche (fig. 4c, d). Le Mg est présent à des concentrations plus élevées dans la branche supérieure que dans la branche inférieure. Les concentrations du Mn et du Ca sont du même ordre dans les deux branches.

Les métaux lourds (Cu, Zn et Pb) ne montrent pas de variations notables de la concentration dans la branche apicale (fig. 4e). Dans la branche médiane (fig. 4f), la distribution du Zn est toujours stable, mais il y a enrichissement en Cu entre la section à 0 cm et celle à 125 cm. Bien que la concentration de Cu au point d'insertion soit inférieure dans la branche médiane, elle augmente de manière importante vers l'extrémité de cette branche, pour atteindre 5,8 ppm au bout de la branche apicale et 18,4 ppm au bout de la branche médiane. La branche apicale a une teneur en Pb moindre que celle de la branche médiane. Dans cette dernière, les concentrations de Pb sont assez variées tout au long de l'axe sans toutefois qu'une tendance claire ne s'en dégage.

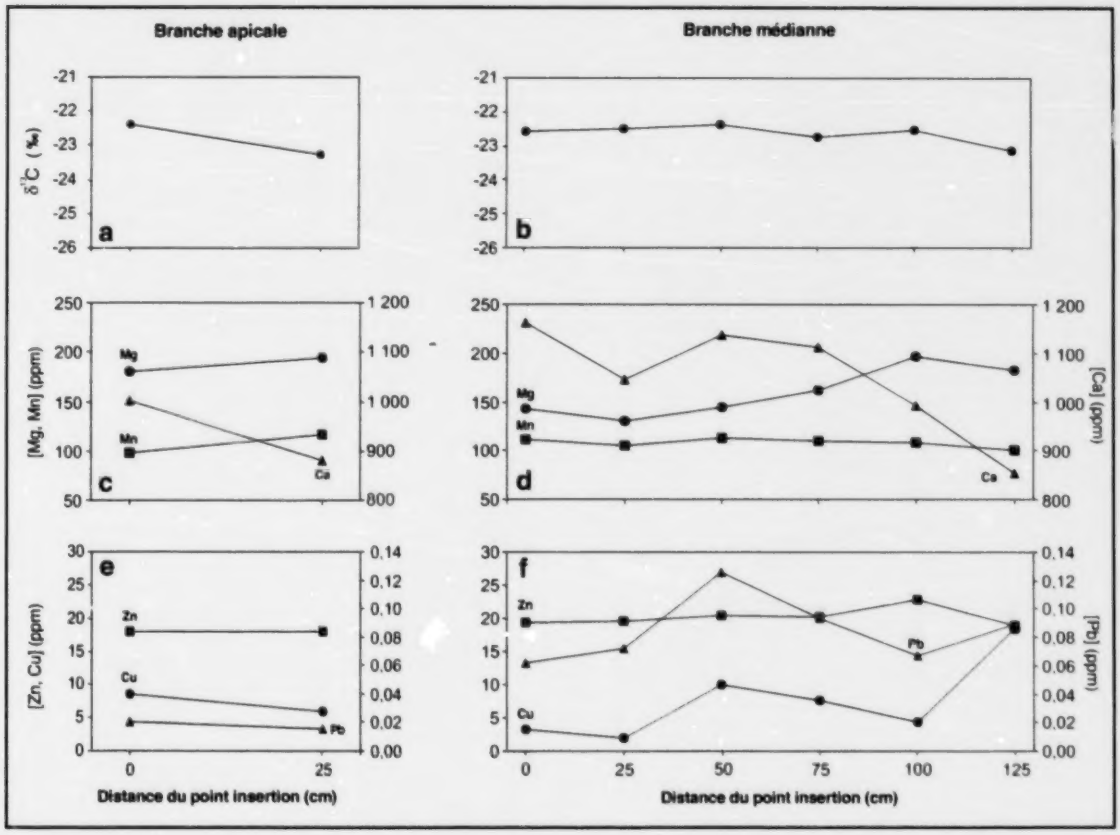

Figure 4. *Distribution des rapports $\delta^{13}C$, des nutriments et des métaux lourds dans les branches. La branche apicale (à 12 m) est représentée à gauche, la branche médiane (à 6 m) est représentée à droite. Les concentrations du Ca et du Pb sont reportées sur l'ordonnée de droite.*

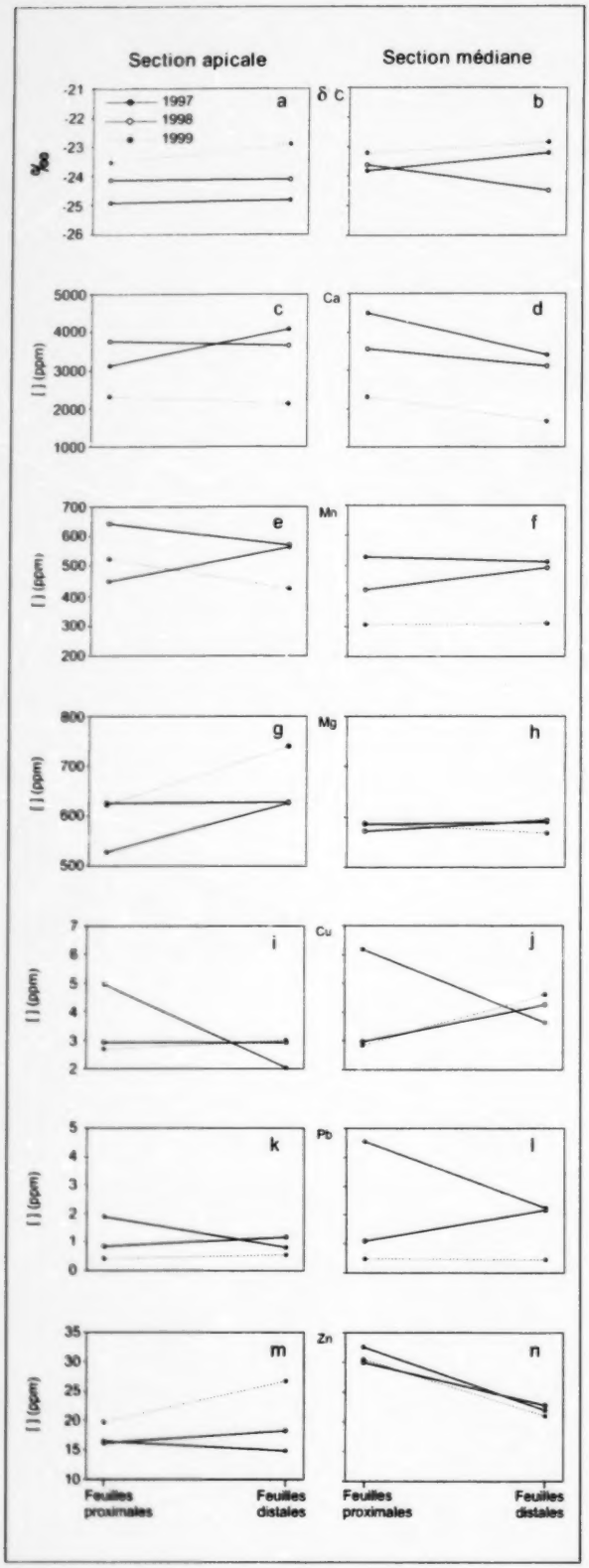

Figure 5.

Distribution des rapports $\delta^{13}C$, des nutriments et des métaux lourds dans les feuilles. Les feuilles provenant de la section apicale (à 12 m) sont représentées dans la colonne de gauche, les feuilles de la section médiane (à 6 m) dans la colonne de droite. Les feuilles échantillonnée sur la partie proximale de la branche (plus près du tronc) sont sur le côté gauche des graphiques. Les feuilles échantillonnées sur la partie distale sont sur le côté droit.

Le feuillage provenant de la portion apicale connaît une diminution graduelle du rapport $\delta^{13}C$ entre les aiguilles formées en 1999 et celles de 1997. Cette tendance se dessine aussi dans les aiguilles provenant de la portion médiane de l'arbre (fig. 5a, b). Il y a un léger enrichissement en ^{13}C dans les feuilles en position distale dans presque tous les cas.

Dans le cas des concentrations de Ca et de Mn mesurées dans les feuilles, on observe généralement un enrichissement avec l'âge et ce, dans les deux sections analysées sur l'arbre (fig. 5c, d, e, f). Les concentrations de Ca des feuilles provenant de la section apicale sont quasi identiques à celles des feuilles de la section médiane. Les concentrations moyennes de Mn sont légèrement supérieures dans les feuilles provenant de l'apex. La distribution du Mg (fig. 5g, h) est différente de celle du Ca et du Mn. Les concentrations de Mg sont plus élevées dans les jeunes feuilles, notamment dans la portion apicale de l'arbre. De plus, les concentrations sont très homogènes dans toutes les feuilles de la portion médiane, contrairement à celles de l'apex qui montrent beaucoup plus de variation.

Le Cu et le Pb ont un modèle de distribution comparable (fig. 5i, j, k, l). Dans les sections apicale et médiane, on note un enrichissement progressif avec l'âge des feuilles. Les concentrations de Cu et de Pb sont en règle générale plus élevées dans les feuilles provenant de la section médiane. Pour ces deux éléments toujours, les feuilles situées en position proximale ont des concentrations plus faibles que les feuilles en position distale et ce, pour les années 1998 et 1999. Par contre, les concentrations dans les feuilles plus âgées (1997) ont un comportement inverse. Le Zn se comporte différemment selon la hauteur des feuilles sur la tige (fig. 5 m, n). Dans la zone apicale, on observe un enrichissement entre la position proximale et la position distale alors que le phénomène est inversé dans la portion médiane de la tige. La même observation vaut pour l'âge des feuilles : les plus jeunes sont enrichies à l'apex alors qu'elles ont les plus faibles concentrations plus bas sur la tige. Enfin, la concentration moyenne de Zn est plus faible dans les feuilles supérieures que dans les feuilles inférieures.

Globalement, les rapports isotopiques du carbone augmentent systématiquement des feuilles (moyenne de -24 ‰) aux branches (moyenne de -22,5 ‰), du sommet de la tige (-22,6 ‰) au reste de la tige (-21,5 ‰). Les trois nutriments étudiés présentent une tendance similaire. Leur concentration moyenne augmente du collet vers l'apex de la tige. Elle augmente ensuite en passant aux branches pour atteindre des valeurs beaucoup plus élevées dans les feuilles.

DISCUSSION

Assimilation du carbone

Le carbone utilisé par l'arbre provient du CO_2 atmosphérique et est assimilé lors de la photosynthèse via les stomates des feuilles. Le rapport isotopique du CO_2 atmosphérique est d'environ -7,5‰ si aucun effet de couvert ne l'influence. Lors du processus de photosynthèse, après les diffusions gazeuse et liquide, le CO_2 est converti en glucose ($C_6H_{12}O_6$) par l'enzyme RubP (Ribulose-1,5-biphosphate) au site de la carboxylation. Le glucose sera à son tour métabolisé pour produire, entre autres choses, la cellulose de l'arbre. Les fractionnements s'additionnent au cours des processus de diffusion et de carboxylation pour produire un appauvrissement global en ^{13}C lors de la photosynthèse comparativement au rapport $\delta^{13}C$ de la source atmosphérique. Le glucose produit a un rapport isotopique d'environ -27‰ (Farquhar et al., 1982). Depuis cette étape, les phases subséquentes d'assimilation du carbone suivent l'ordre de priorité d'allocation : feuilles, petites branches, grandes branches, haut de la tige et base de la tige. Pour la cellulose extraite des feuilles, des branches et de la tige (cernes de croissance), le rapport isotopique du carbone augmente systématiquement dans l'ordre donné. Cette tendance isotopique est interprétée comme étant un processus Rayleigh. En effet, la quantité de carbone introduite au niveau de la feuille sous forme de glucose constitue un réservoir clos subissant une perte préférentielle des isotopes légers lors de la production de tissus comme la cellulose. Le réactif (glucose) s'enrichit ainsi en ^{13}C lors de son cheminement de la feuille à la base du tronc suivant une équation du type $\delta^{13}C_F = \delta^{13}C_0 F^{\alpha-1}$, où $\delta^{13}C_0$ représente le signal isotopique initial avant le déplacement le long de la voie d'allocation, F représente la fraction résiduelle d'hydrate de carbone à un site donné et α représente le facteur de fractionnement biosynthétique.

L'accroissement du rapport $\delta^{13}C$ de 1997 à 1999 représente un simple reflet des conditions climatiques et écologiques prévalant durant la saison de croissance.

Assimilation des nutriments

Les nutriments sont puisés dans le sol sous la forme d'ions dissous et sont acheminés le long de la tige jusqu'à l'appareil foliaire grâce au processus de la transpiration. L'enrichissement progressif en Ca, en Mn et en Mg enregistré depuis la base de l'arbre vers la partie supérieure de la tige pour atteindre les concentrations les plus élevées dans le feuillage montre bien la priorité d'allocation des nutriments pour le site de la photosynthèse. L'enrichissement en nutriments entre la base de la tige et sa portion apicale reflète entièrement cette priorité d'allocation, tout comme l'enrichissement vers l'extrémité des branches. L'appauvrissement en Ca vers l'extrémité des branches reste toutefois difficile à expliquer. Il est peut-être relié à la méthode d'échantillonnage qui diffère pour cette partie de l'arbre. Le fait d'évaluer la concentration moyenne sur toute la section de la branche en prenant tous les cernes de croissance au niveau échantillonné a peut-être influencé les résultats. Il faut toutefois noter qu'il y a également une légère diminution des concentrations entre les feuilles proximales et les feuilles distales. Il est possible que le Ca contenu dans la sève soit assimilé par les premières feuilles rencontrées, celles en position proximale, et qu'il y ait ainsi appauvrissement en Ca d'un bout à l'autre de la branche. Bien que certaines questions concernant l'assimilation du Ca le long de la branche restent en suspens, son acheminement vers les feuilles est très clair tout comme l'est l'acheminement du Mg et du Mn. La concentration respective de ces éléments atteint des valeurs nettement plus

élevées dans le feuillage. La faible mobilité du Ca et du Mn explique les concentrations supérieures de ces deux nutriments dans les feuilles les plus vieilles. La concentration plus élevée en nutriments peu mobiles comme le Ca et le Mn dans les feuilles les plus âgées laisse supposer que cet arbre n'est pas en carence de ces éléments. Le Mg est au contraire un élément très mobile. Il y a probablement translocation vers les feuilles les plus jeunes. Les résultats montrent effectivement un accroissement de la concentration de Mg entre les feuilles de 1997 et celles de 1999, plus particulièrement dans la section apicale.

En somme, la concentration des nutriments diminue de la feuille vers les branches puis dans le tronc. Par conséquent, l'assimilation du Ca dans l'arbre suit donc une route identique à celle du carbone, telle qu'identifiée par le processus Rayleigh décrit plus haut.

Assimilation et accumulation passive des métaux lourds

La voie active d'assimilation des métaux est la même que pour les nutriments. Certains éléments tels le Cu et le Zn sont essentiels au fonctionnement enzymatique de l'arbre. Les résultats montrent clairement que le Zn est assimilé de façon semblable aux nutriments dans la tige. Les branches et les feuilles sont même enrichies par rapport aux cernes de croissance. Trüby (1995) a constaté que la distribution du Cu est fortement influencée par la translocation et que le mécanisme tend à transférer cet élément vers les tissus les plus jeunes. L'abondance relative de cet élément dans le cerne de 1999 (près de la zone cambiale) traduit probablement ce phénomène. Les concentrations de Cu sont stables sur toute la longueur de la tige, mais elles vont jusqu'à tripler dans les branches. Cependant, les concentrations dans les feuilles sont du même ordre que celles de la tige. La quantité élevée de Cu dans les branches est peut-être liée, elle aussi, à la méthode d'échantillonnage sur les branches. Le Pb a une distribution tout à fait particulière. Bien que les concentrations diminuent en montant dans la tige et qu'elles soient encore plus faibles dans les branches, c'est sur les feuilles qu'elles sont les plus élevées. Le Pb est un élément toxique et on ne lui connaît aucun apport bénéfique dans le métabolisme de l'arbre. En principe, le Pb absorbé par les racines est rapidement acheminé à l'interface aubier–duramen (Trüby, 1995) de sorte que très peu de Pb devrait être mesuré dans les feuilles. Rappelons que les feuilles n'ont subies aucun nettoyage avant l'analyse géochimique. Des études ont montré que l'accumulation de particules sur la surface foliaire constitue un apport non négligeable (Rautio et al., 1998; Trimbacher et Weiss, 1999). En 1998 seulement, la fonderie Horne a rejeté 70 tonnes de cuivre, 150 tonnes de plomb et 39 tonnes de zinc dans l'atmosphère (données fournies par Noranda inc., 1998). Une fraction de ces métaux lourds est déposée au sol mais aussi directement sur le feuillage des arbres à proximité. Une accumulation passive du Pb sur le feuillage est probablement responsable de la teneur très élevée de cet élément dans les feuilles analysées. Une partie du Cu et du Zn retrouvés dans les feuilles a probablement la même provenance.

Validation du protocole d'échantillonnage

Les arbres analysés dans le cadre du projet DINAMITE sont échantillonnés à une hauteur de 1 m. Cette pratique a été évaluée en étudiant les profils chimiques le long du tronc. Pour ce qui est du $\delta^{13}C$, l'échantillonnage ne devrait pas entraîner de variations marquées dues à une différence relative de hauteur des échantillons puisque le rapport isotopique reste en pratique invariable jusqu'à 2 m de la cime. Toutefois, un changement significatif existe pour la plupart des éléments analysés. Rappelons que dans tous les cas, c'est la série chronologique complète qui sert d'outil d'interprétation. Toute déduction utilisera ainsi une comparaison de propriétés des sous-séries temporelles, celles-là étant toutes de même hauteur à la tige et donc éminemment comparables. Ce sont les valeurs absolues des concentrations d'éléments obtenues pour chaque arbre qui ne seront pas comparables.

CONCLUSIONS

L'assimilation des nutriments et des métaux lourds se fait essentiellement au niveau du système racinaire. En présence d'une source industrielle à proximité, l'accumulation passive des éléments sous forme de poussières atmosphériques constitue toutefois un apport non négligeable, notamment au niveau du système foliaire. L'assimilation du carbone est marquée par un processus Rayleigh qui suggère la même priorité d'allocation que celle observée pour les nutriments. Le protocole d'échantillonnage établi pour le programme DINAMITE n'amène pas de biais pour les analyses géochimiques des longues séries chronologiques établies à partir d'épinettes provenant d'environnements exposés à des intensités variées de contaminants.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le réseau de recherche du MEDE pour l'appui financier accordé. Anna Smirnov, Marc Luzincourt et Alex Smirnov du Laboratoire Delta de la Commission géologique du Canada de même que Réal Gosselin et Isabelle Bélanger du laboratoire INRS-Géoressources ont contribué activement au succès de cette étude. La Noranda inc. a aimablement fourni des données sur les émissions de la fonderie Horne. Les auteurs souhaitent remercier Daniel Lebel pour sa lecture critique du manuscrit.

RÉFÉRENCES

Bégin, C., Savard, M.M., Parent, M., Cloutier, J., and Smirnov, A.
1998: Combining dendroecological and dendrogeochemical data to monitor natural and anthropogenic stress in coniferous vegetation: the example of the Rouyn-Noranda smelter area; Geological Society of America, Abstract with Programs, v. 30, p. A.

Epstein, S., Yapp, C.J., and Hall, J.H.
1976: The determination of the D/H ratio of non-exchangeable hydrogen in cellulose extracted from aquatic and land plants; Earth And Planetary Science Letters, v. 30, p. 241–251.

Farquhar, G.D., O'Leary, M.H., and Berry, J.A.
1982 : On the relationship between carbon isotope discrimination an the intercellular carbon dioxide concentration in leaves; Australian Journal of Plant Physiology, v. 9, p. 121–137.

Ministère de l'Environnement et de la Faune
1996: Précipitations acides au Québec : État de la situation (1996). Rapport d'évaluation multisectoriel; ministère de l'Environnement et de la Faune et ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec, 49 p.

Rautio, P., Huttunen S., Kukkola, E., Peura, R., and Lamppu, J.
1998: Deposited particles, element concentrations, and needle injuries on Scots pines along an industrial pollution transect in northern Europe; Environmental Pollution, v. 103, p. 81–89.

Savard, M.M., Bégin, C., and Parent, M.
1999: $\delta^{13}C_{cellulose}$ in tree rings: development of a new biomonitoring tool for point source atmospheric pollutants; Third International Symposium on Applied Geochemistry (AIG-3), Program and Abstracts, September 21–25, Orléans, France, p. 89.

Savard, M.M., Bégin C., Parent M., Smirnov, A., Luzincourt, M.R., Boivin, S., Cloutier, J., and Marion, J.
2000: DINAMITE — Multi-tracer chemistry of tree rings as a high resolution biomonitoring tool for point source atmospheric pollutants, International Thematic Session on Advances in Earth and Planetary Sciences by Isotope Ratio Mass Spectrometry (TS 28), GeoCanada 2000, Calgary, Alberta (abstract on CD-ROM).

Trimbacher, C. and Weiss, P.
1999: Needle surface characteristics and element contents of Norway spruce in relation to the distance of emission sources, Environmental Pollution, v. 105, p. 111–119.

Trüby, P.
1995: Distribution patterns of heavy metals in forest trees on contaminated sites in Germany; Angewandte Botanik, v. 69, p. 135–139.

Projet 960002-M2 de la Commission géologique du Canada